1. INTRODUCCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PROCESOS

1.1. Soldadura Ideal (Concepto Teórico)

Caras atómicamente planas, libres de óxido y contaminantes, acercadas a distancia interatómica para lograr el enlace metálico sin fusión ni presión. Base conceptual de los procesos de estado sólido. (Jeffus, Cap. 1)

1.2. Definiciones Fundamentales (AWS A3.0)

- **Soldadura (Welding):** Proceso de unión que produce la **coalescencia** de los materiales mediante calentamiento a la temperatura de soldadura, con o sin aplicación de presión, y con o sin empleo de metal de aporte. (Fuente: AWS A3.0).
- **Soldabilidad (Weldability):** Capacidad de un material para ser soldado bajo las condiciones de fabricación impuestas, en una estructura específica diseñada apropiadamente, y para desempeñarse satisfactoriamente en el servicio proyectado. Depende de tres factores interrelacionados: material, diseño y producción. (Basado en AWS/ISO).
- **Coalescencia (Coalescence):** Fenómeno por el cual los materiales se unen o fusionan entre sí, formando un todo continuo. En términos metalúrgicos, implica el establecimiento de enlaces metálicos a nivel atómico entre las partes. (AWS A3.0).
- **Metal Base (Base Metal):** El material que se va a soldar, cortar o sobre el que se deposita una superficie. (AWS A3.0).
- **Metal de Aporte (Filler Metal):** Material añadido durante la soldadura, brazing o soldering para contribuir a formar la unión. (AWS A3.0).
- **ZAC (Zona Afectada por el Calor) / HAZ (Heat-Affected Zone):** Porción del metal base que no ha fundido, pero cuyas propiedades mecánicas o microestructura han sido alteradas por el calor del proceso de soldadura. (AWS A3.0).
- **Penetración (Joint Penetration):** Distancia que la soldadura se extiende desde la cara de la unión hacia el interior de la junta, excluyendo el refuerzo. (AWS A3.0).
- **Cordón de Soldadura (Weld Bead):** Soldadura resultante de una pasada. (AWS A3.0).
- **Pasada (Pass):** Una sola progresión de la soldadura a lo largo de la junta. (AWS A3.0).

1.3. Clasificación de Procesos (Carta Maestra AWS A3.0)

La clasificación principal según la **Carta Maestra de Procesos de Soldadura y Procesos Aliados** (AWS A3.0) se basa en el estado físico de los materiales durante la unión y la fuente de energía.

1.3.1. 1. Soldadura por Arco (AW – Arc Welding)

Característica: Fusión del metal base (y aporte) mediante un arco eléctrico.

- **SMAW (Shielded Metal Arc Welding):** Manual con electrodo revestido. (Norma AWS A5.1).
- **GMAW (Gas Metal Arc Welding):** Alambre macizo continuo con gas de protección (MIG/MAG). (AWS A5.18).
- **FCAW (Flux Cored Arc Welding):** Alambre tubular, con o sin gas auxiliar. (AWS A5.20).
- **GTAW (Gas Tungsten Arc Welding):** Electrodo no consumible de tungsteno y gas inerte (TIG). (AWS A5.12).
- **SAW (Submerged Arc Welding):** Arco sumergido bajo fundente granular. (AWS A5.17).
- **PAW (Plasma Arc Welding):** Arco constreñido de alta temperatura y densidad energética.

1.3.2. 2. Soldadura de Estado Sólido (SSW – Solid-State Welding)

Característica: Unión sin fusión del metal base. Se logra por presión, deformación, difusión o fricción.

- **FRW (Friction Welding):** Calor generado por fricción mecánica, seguido de presión.
- **EXW (Explosion Welding):** Unión por impacto de alta velocidad debido a una explosión controlada.
- **DFW (Diffusion Welding):** Unión por difusión atómica bajo presión y calor (por debajo de la fusión).
- **USW (Ultrasonic Welding):** Vibraciones ultrasónicas y presión producen calor por fricción local.

1.3.3. 3. Soldadura Sólida/Líquida (Brazing and Soldering)

Característica: Procesos en los que se funde un metal de aporte con punto de fusión inferior al del metal base, que NO se funde. La unión se produce por adhesión y difusión, con acción capilar.

- **Brazing (Soldadura Fuerte):** Temperatura del metal de aporte $> 450\,^{\circ}$C. (Norma AWS A5.8).
- **Soldering (Soldadura Blanda):** Temperatura del metal de aporte $\leq 450\,^{\circ}$C. (AWS A5.8).

1.4. Posiciones de Soldadura (ASME/AWS A3.0)

La nomenclatura combina un número (1 a 6) que indica la inclinación del eje, y una letra (G o F) que indica el tipo de junta.

- **1G / 1F (Plana – Flat):** Eje horizontal, cara de la soldadura hacia arriba. Posición más fácil y productiva.
- **2G (Horizontal – Groove):** Cara en plano vertical, eje horizontal.
- **2F (Horizontal – Fillet):** Soldadura sobre superficie vertical.
- **3G / 3F (Vertical):** Eje vertical. Puede ser ascendente o descendente.
- **4G / 4F (Sobre Cabeza – Overhead):** Cara hacia abajo.
- **5G (Tubería horizontal fija):** Tubería fija, eje horizontal. El soldador recorre todas las posiciones.
- **6G (Tubería inclinada fija a 45°):** La posición más compleja para la calificación de soldadores (ASME IX, AWS D1.1).

1.5. Técnica de Avance y Ángulos (AWS A3.0)

- **Ángulo de Trabajo (Work Angle):** Ángulo entre el electrodo y las caras de la unión, medido perpendicularmente al eje de la soldadura.
- **Ángulo de Avance (Travel Angle):** Ángulo entre el electrodo y una línea perpendicular al eje de la soldadura, medido en el plano de avance.
  - **Técnica de Empuje (Forehand / Push):** El electrodo apunta en la dirección de avance. Menor penetración, cordón más ancho y plano. Típico en GTAW de aluminio.
  - **Técnica de Arrastre (Backhand / Drag):** El electrodo apunta en dirección opuesta al avance. Mayor penetración, cordón más estrecho y abultado. Común en SMAW y GMAW sobre acero.

1.6. Vocabulario Técnico Crítico (AWS A3.0)

- **Pileta Líquida (Weld Pool):** Zona de metal fundido durante la soldadura.
- **Raíz (Root):** Parte más profunda de la unión. Su correcta fusión es crítica.
- **Cara de la Soldadura (Weld Face):** Superficie expuesta por el lado donde se realizó la soldadura.
- **Bisel (Groove):** Abertura preparada en los cantos del metal base para alojar la soldadura en espesores medios y gruesos. La geometría (ángulo, talón, abertura de raíz) está definida en códigos como AWS D1.1.
- **Paso Peregrino (Backstep Sequence):** Técnica de secuencia de soldeo para controlar la distorsión, soldando en dirección opuesta al avance general.
- **Ciclo Térmico:** Variación de temperatura en un punto de la unión en función del tiempo. (Se desarrolla en Unidad 4).
- **Dilución (Dilution):** Fracción del metal base que se funde y mezcla con el metal de aporte. (AWS A3.0, Unidad 4).
- **Cráter (Crater):** Depresión al final del cordón, donde se interrumpe el arco. Puede ser fuente de fisuras si no se rellena.

1.7. Tips de Examen (Basados en Ing. Cinollo y Jeffus)

- **Diferencia Clave (Unión vs. Fusión):**
  - **Arco (AW):** Siempre funde el metal base.
  - **Brazing/Soldering:** Nunca funden el metal base. La unión es por adhesión y acción capilar del aporte fundido.
- **Modos de Operación de los Procesos:** (Jeffus, Cap. 1)
  - **Manual:** El soldador controla y manipula todo (SMAW).
  - **Semiautomático:** El equipo controla la alimentación del alambre; el soldador manipula la pistola (GMAW, FCAW).
  - **Mecanizado/Automático:** La máquina realiza la operación bajo supervisión (SAW con tractor).
  - **Automatizado (Robótico):** Un robot programable realiza la operación de forma autónoma.
- **Normativa Clave:**
  - **AWS A3.0:** Base terminológica.
  - **CIRSOC 304:** Reglamento argentino para estructuras de acero soldadas.

- **AWS D1.1:** Código de soldadura estructural (acero).
- **ASME Sección IX:** Calificación de soldadores y procedimientos.

- **Representación en Planos:** Los símbolos de soldadura siguen la norma **AWS A2.4**. La posición del símbolo respecto a la línea de referencia indica el lado de la junta (flecha u opuesto). (Se detalla en Unidad 8).

2. ARCO ELÉCTRICO

2.1. ¿Qué es el arco eléctrico?

El arco eléctrico es una descarga continua de electrones entre dos electrodos a diferente potencial, mantenida a través de una columna gaseosa térmicamente ionizada denominada **plasma**. (AWS A3.0)

Funciones del arco en soldadura:
- Transformar energía eléctrica en energía calórica.
- Destruir la película superficial de óxido (acción de limpieza).
- Fundir localizadamente el metal base y, en su caso, el metal de aporte.

Variables típicas: Tensión $V = 10\,\text{V}$ a $50\,\text{V}$; corriente $I = 50\,\text{A}$ a $1000\,\text{A}$.

2.2. Física del arco. Plasma formado

El arco se produce por la ionización de un gas. La relación de partículas cargadas respecto a neutras sigue una ley de Arrhenius:

$$\frac{\text{cargadas}}{\text{neutras}} \propto e^{-V_i/(kT)}$$

donde V_i es el potencial de ionización del gas. El plasma es un gas ionizado eléctricamente neutro (igual número de electrones e iones positivos) que actúa como conductor.

2.3. Elementos ionizantes principales

El potencial de ionización (V_i) determina la facilidad para formar el arco. Elementos con bajo V_i facilitan la ionización:
- Metales alcalinos (Na, K): $V_i \approx 4$–5 eV
- Calcio (Ca): $V_i \approx 6,1$ eV
- Argón (Ar): $V_i \approx 15,8$ eV
- Helio (He): $V_i \approx 24,5$ eV

En los electrodos revestidos (SMAW), se añaden silicatos de Na y K para estabilizar el arco. En GTAW, el gas de protección (Ar, He) influye en la ionización.

2.4. Zonas características del arco

El arco se divide en tres regiones con diferente caída de potencial:
- **Zona catódica (−):** Emisión de electrones. Se genera aproximadamente 1/3 del calor total.
- **Columna de plasma:** Zona de alta temperatura (6000 a 20000 °C, según el gas) y transporte de carga. Es eléctricamente neutra.
- **Zona anódica (+):** Bombardeo de electrones, convierte su energía cinética en calor. Genera aproximadamente 2/3 del calor total.

2.5. Emisión termoiónica y no termoiónica

La emisión de electrones desde el cátodo puede ocurrir por dos mecanismos:
- **Emisión termoiónica:** El cátodo se calienta intensamente (efecto Joule) hasta alcanzar la energía necesaria para liberar electrones. Típica en electrodos de tungsteno con óxidos (Th, Zr, Ce) que reducen el potencial de ionización y permiten trabajar a menor temperatura.
- **Emisión no termoiónica (por campo):** Se produce por un campo eléctrico muy intenso ($> 10^9$ V/m) que arranca electrones de un cátodo relativamente frío. Ocurre en polaridad inversa (DCEP) o en corriente alterna, y contribuye a la limpieza de óxidos superficiales.

2.6. Electrodos de tungsteno: W, W+Th, W+Zr

En procesos con electrodo no consumible (GTAW), el tungsteno se alea con óxidos para mejorar la emisión termoiónica y la vida útil:
- **W puro (verde):** Para corriente alterna (CA) en aluminio y magnesio. Forma punta de bola.
- **W + ThO_2 (toriado, rojo/amarillo):** Alta emisión termoiónica, excelente para corriente continua (CC–) en aceros. Ligeramente radiactivo.
- **W + ZrO_2 (zirconado, marrón/blanco):** Resistente a la contaminación, adecuado para CA y CC.
- **W + La_2O_3 (lantano, negro/dorado/azul):** Sustituto no radiactivo del toriado, buen encendido y capacidad de corriente.
- **W + CeO_2 (cerio, gris):** Para bajas corrientes y aplicaciones orbitales.

(Ver norma AWS A5.12 para detalles completos).

2.7. Influencia del tipo de corriente y polaridad

La distribución del calor y la limpieza de óxidos dependen de la polaridad:

Característica	DCEN (CC–)	DCEP (CC+)	CA (AC)
Calor en la pieza	70 % (máx.)	30 % (mín.)	50 % / 50 %
Penetración	Profunda/ estrecha	Muy superficial	Media
Calor en el electrodo	Bajo (punta fría)	Alto (punta caliente)	Medio
Limpieza de óxidos	No	Sí (acción catódica)	Sí (en semiciclo +)
Aplicaciones típicas	Aceros, Ti, Cu	Muy poco usado	Al, Mg, aleaciones

2.8. Calor aportado (Heat Input)

$$Q = \frac{V \cdot I}{v_s} \times 60 \quad [\text{J/cm}]$$

donde v_s es la velocidad de avance en [cm/min]. El factor 60 convierte minutos a segundos.

Rendimiento térmico (η): Fracción de la energía del arco que se transfiere a la pieza.
- **SMAW:** $\eta = 70\,\% - 85\,\%$
- **GMAW / SAW:** $\eta = 80\,\% - 90\,\%$
- **GTAW:** $\eta = 20\,\% - 50\,\%$ (pérdidas por radiación y refrigeración)

2.9. Soplo magnético

Causa: Interacción del campo magnético generado por la corriente de soldadura con el material ferromagnético o con la distribución asimétrica de la corriente (especialmente en CC). Las líneas de fuerza se concentran en un lado, desviando el arco.

Problemas: Salpicaduras, falta de penetración, porosidad, cordón irregular.

Soluciones prácticas:
- Cambiar a corriente alterna (CA) – elimina el efecto por inversión del campo.
- Reducir la intensidad de corriente.
- Inclinar el electrodo en dirección opuesta al soplo.
- Colocar "tacos" de material (apéndices) al inicio y final de la junta.
- Cambiar la posición de la pinza de masa, conectándola cerca del extremo de la junta y soldando hacia ella.
- Usar dos conexiones de masa equilibradas.

2.10. Fuentes de poder y características eléctricas

Las fuentes se clasifican por su característica estática:
- **Corriente Constante (CC / Drooping):** La corriente varía poco ante cambios de voltaje. Ideal para procesos manuales (SMAW, GTAW, PAW).
- **Voltaje Constante (VC / Flat):** El voltaje se mantiene constante; pequeños cambios de arco producen grandes variaciones de corriente, autorregulando la fusión del alambre. Ideal para semiautomáticos (GMAW, FCAW, SAW).

Ciclo de trabajo (Duty cycle): Porcentaje de tiempo en 10 minutos que la fuente puede operar a corriente nominal sin sobrecalentarse.

Proceso	C. Constante	V. Constante
SMAW	X	–
GTAW	X	–
GMAW	–	X
FCAW	–	X
SAW	–	X
PAW	X	–
PAC	X	–

2.11. Normas citadas

- **AWS A3.0:** Standard Welding Terms and Definitions.
- **AWS A5.12:** Especificación para electrodos de tungsteno.
- **NEMA:** Clasificación de fuentes de poder y ciclos de trabajo.

3. METALURGIA DE LA SOLDADURA

3.1. Introducción

La soldadura por arco implica un ciclo térmico severo que modifica la microestructura del metal base y del metal depositado. El conocimiento de estos cambios es fundamental para predecir y controlar las propiedades mecánicas de la unión.

3.2. Zona fundida y Zona afectada por el calor (ZAC)

- **Zona fundida:** Metal completamente fundido durante el proceso. Está compuesta por metal de aporte y metal base fundido y mezclado (dilución). Su microestructura depende de la composición y de la velocidad de enfriamiento.
- **Zona afectada por el calor (ZAC o HAZ):** Región del metal base que no alcanza la fusión, pero sufre modificaciones microestructurales debido al calor. Se extiende desde la línea de fusión hasta el metal base inalterado.

3.3. Dilución

La dilución es la fracción del metal base que se funde y se mezcla con el metal de aporte en el cordón de soldadura. Se expresa en porcentaje:

$$\text{Dilución} = \frac{\text{Área del metal base fundido}}{\text{Área total del cordón}} \times 100$$

Influencia:
- Afecta la composición química final del metal depositado.
- En soldaduras de aceros inoxidables o disímiles, la dilución determina la microestructura resultante (ej. uso de diagramas de Schaeffler).
- Valores típicos: SMAW 15–30 %, GMAW 20–40 %, GTAW 10–30 %.

3.4. Ciclo térmico y velocidad de enfriamiento

El ciclo térmico es la variación de temperatura en un punto de la unión en función del tiempo. Se caracteriza por:
- Calentamiento muy rápido (hasta la fusión).
- Breve permanencia a alta temperatura.
- Enfriamiento relativamente rápido.

La velocidad de enfriamiento determina la microestructura final. Se utiliza comúnmente el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C ($\Delta t_{8/5}$).

Factores que afectan el ciclo térmico:
- Calor aportado (Q): a mayor Q, menor velocidad de enfriamiento y mayor ancho de ZAC.
- Precalentamiento (T_0): reduce la velocidad de enfriamiento.
- Espesor y geometría: a mayor espesor, enfriamiento más rápido.

Ejemplo de influencia del calor aportado y precalentamiento (para un punto que alcanza 1365 °C):

Calor Aportado (J/cm)	Temperatura Inicial	$\Delta t_{8/5}$ (seg)
18.000	27 °C	20
18.000	260 °C	43
40.000	27 °C	82
40.000	260 °C	>180

3.5. Estructura metalográfica en una sola pasada

Según la temperatura máxima alcanzada en la ZAC de un acero al carbono (ej. 0,20 % C), se distinguen las siguientes zonas (desde el cordón hacia el exterior):
- **Zona fundida:** T >1539 °C.
- **Zona parcialmente fundida:** 1492–1539 °C (muy estrecha).
- **Zona de crecimiento de grano (CGHAZ):** 1000–1492 °C. Grano austenítico grueso, baja tenacidad.
- **Zona de grano fino (FGHAZ):** 840–1000 °C. Austenización completa, grano refinado.
- **Zona intercrítica (ICHAZ):** 723–840 °C. Transformación parcial, microestructura mixta.
- **Zona subcrítica (SCHAZ):** 400–723 °C. Solo revenido, sin transformación.
- **Metal base no afectado:** T <400 °C.

3.6. Estructura en multi-pasadas

En soldaduras de múltiples pasadas, cada cordón posterior impone un ciclo térmico adicional sobre los anteriores, actuando como tratamiento térmico:
- **Efecto refinador:** Si un cordón posterior calienta la zona de grano grueso previa por encima de A_{c3}, se produce una nueva austenización y refinamiento.
- **Nomenclatura IIW para zonas recalentadas:**
  - **SCGC:** Zona de grano grueso recalentada por debajo de A_{c1} (revenido).
  - **ICGC:** Recalentada entre A_{c1} y A_{c3} (transformación parcial).
  - **SRGC:** Recalentada por encima de A_{c3} (refinamiento).
  - **UAGC:** No modificada por pasadas posteriores.

3.7. Clasificación de microestructuras según IIW

El International Institute of Welding (IIW) propuso un esquema para la identificación de microconstituyentes en aceros ferríticos soldados:

Categoría	Abreviatura
Ferrita Primaria (Primary Ferrite)	PF
Ferrita de Borde de Grano (Grain Boundary Ferrite)	PF(G)
Ferrita Poligonal Intragranular (Intragranular Polygonal Ferrite)	PF(I)
Ferrita con Segunda Fase (Ferrite with Second Phase)	FS
Ferrita con Segunda Fase No Alineada (Non-aligned)	FS(NA)
Ferrita con Segunda Fase Alineada (Aligned)	FS(A)
Ferrita de Placas Laterales (Ferrite Side Plates)	FS(SP)
Bainita (Bainite)	FS(B)
Bainita Superior (Upper Bainite)	FS(UB)
Bainita Inferior (Lower Bainite)	FS(LB)
Ferrita Acicular (Acicular Ferrite)	AF
Agregado Ferrita-Carburo (Ferrite-Carbide Aggregate)	FC
Perlita (Pearlite)	FC(P)
Martensita (Martensite)	M
Martensita en Listones (Lath Martensite)	M(L)
Martensita Maclada (Twin Martensite)	M(T)

3.8. Ferrita Acicular (AF) y tenacidad

La ferrita acicular es el microconstituyente más deseable por su alta tenacidad:
- Nuclea heterogéneamente en inclusiones dentro del grano austenítico.
- Requiere un tamaño de grano austenítico grande y adecuada población de inclusiones.
- Su estructura de placas entrecruzadas dificulta la propagación de fisuras.

Relación tenacidad −%AF: A mayor contenido de ferrita acicular, mayor energía absorbida en el ensayo Charpy (especialmente a bajas temperaturas).

3.9. Relación entre estructuras y propiedades mecánicas

- **Ferrita y perlita:** Ductilidad y tenacidad moderadas, resistencia media.
- **Bainita:** Mayor resistencia y dureza, tenacidad variable según temperatura de formación.
- **Martensita:** Alta dureza y resistencia, pero baja tenacidad; requiere revenido.
- **Ferrita acicular:** Excelente combinación de resistencia y tenacidad.
- **Grano grueso:** Disminuye tenacidad (relación Hall-Petch inversa).

3.10. Metalografía de una soldadura

El análisis metalográfico (macro y micro) permite:
- Evaluar la penetración, forma del cordón y defectos (poros, inclusiones).
- Identificar las zonas de la ZAC y sus microestructuras.
- Medir la dilución y el tamaño de grano.
- Verificar la presencia de fases no deseadas (ej. martensita en ZAC).

3.11. Brazing y Soldering: principios, aplicaciones y material de aporte

3.11.1. Definiciones y clasificación (AWS A3.0 / AWS A5.8)

Procesos de unión en fase sólido/líquido (S/L) donde el metal de aporte tiene punto de fusión inferior al del metal base. La unión se produce por distribución del metal de aporte fundido en la holgura de la junta mediante **acción capilar**, sin que el metal base se funda.

Clasificación por temperatura:
- **Soldering (soldadura blanda):** T <450 °C.
- **Brazing (soldadura fuerte):** T >450 °C.

Aplicaciones típicas: Unión de insertos duros, componentes de automóviles, intercambiadores de calor, unión de cerámicos con acero, etc.

3.11.2. Metales de aporte (AWS A5.8)

La designación comienza con la letra B (Brazing), seguida de los símbolos químicos de los elementos principales.

Designación	Rango [°C]	Norma	Aplicación típica
BAg (Plata)	618–950	AWS A5.8	Aceros, inox., aleac. Ni, Cu (excepto Al, Mg)
BAlSi (Al-Si)	580–610	AWS A5.8	Aluminio y aleaciones
BCuP (Cu-P)	730–820	AWS A5.8	Aleac. Cu, autofundente en Cu puro
BCu (Cobre)	1090–1150	AWS A5.8	Aceros, inox., aleac. Ni
BCuZn (Latón)	915–970	AWS A5.8	Aceros, fundiciones, aleac. Cu

Ejemplos de aleaciones de plata (familia BAg):
- **BAg-1:** 44–46 % Ag, 14–16 % Cu, 14–18 % Zn, 23–25 % Cd. Muy fluido, baja temperatura, contiene Cd.
- **BAg-7:** 55–57 % Ag, 21–23 % Cu, 15–19 % Zn, 4,5–5,5 % Sn. Libre de Cd, buena fluidez.

Nota: Los metales con cadmio requieren ventilación adecuada.

3.11.3. Diseño de juntas y holgura

- Holgura ideal: 0,02–0,15 mm. Excesiva impide capilaridad; muy estrecha dificulta flujo.
- Junta a solape (lap joint): área de solape $L = 3T$ a $4T$ (T = espesor chapa más delgada).
- Junta a tope con bisel (scarf joint) para aumentar superficie.

3.11.4. Fundentes (flux)

Funciones: eliminar óxidos, prevenir oxidación, reducir tensión superficial. Ejemplo para aluminio: sales de cloruros y fluoruros (KCl-NaCl, NaF, KF-AlF_3). Pueden ser polvos, pastas o incorporados en el metal de aporte.

3.11.5. Mojado y capilaridad

- **Mojado:** Ángulo de contacto $\theta < 90°$ indica buen mojado.
- **Capilaridad:** Fuerza que impulsa el metal fundido en la holgura, inversamente proporcional a la holgura.

3.11.6. Procesos de calentamiento

- Soplete (torch brazing)
- Horno (furnace brazing)
- Inducción
- Resistencia
- Inmersión (dip brazing)
- Atmósfera controlada o vacío

3.11.7. Vocabulario técnico y tips de examen

- **Autofundente:** Propiedad de algunos metales (ej. BCuP sobre Cu) de eliminar óxidos sin fundente externo.
- **Erosión:** Disolución excesiva del metal base.
- **Braze welding:** Similar a brazing pero sin requerir capilaridad (holgura mayor).
- **Limpieza previa:** Esencial para garantizar mojado.
- **Tip:** El fósforo en BCuP actúa como reductor en cobre, pero en acero forma fosfuros frágiles; no usar.

3.12. Normas citadas

- AWS A3.0, AWS A5.8, AWS C3.2, IIW (clasificación microestructuras), ISO TR 581.

4. TENSIONES SOBRE LAS SOLDADURAS

4.1. Introducción: origen de las tensiones

Durante la soldadura se produce un flujo de calor intenso y localizado. El metal base se calienta desde temperatura ambiente hasta la fusión en el centro del cordón, generando un fuerte gradiente térmico (ΔT). Este gradiente provoca dilataciones y contracciones diferenciales, que son la causa raíz de las tensiones residuales y la distorsión.

4.2. Cambios dimensionales y deformación térmica

- **Calentamiento:** La zona cercana al arco se expande, pero el metal circundante, más frío, restringe esta expansión. Se generan tensiones de compresión en la zona caliente, que pueden superar el límite elástico y causar deformación plástica localizada (acortamiento efectivo).
- **Enfriamiento:** Al solidificarse y enfriarse, el metal tiende a contraerse. Si la estructura es rígida y no puede deformarse libremente, se generan **tensiones de tracción** en la zona de soldadura y en la ZAC.

La magnitud de las tensiones residuales puede alcanzar el límite elástico (σ_y) del material.

Factores que influyen en la deformación:
- Coeficiente de dilatación térmica del material.
- Punto de fusión y cambios de fase.
- Calor aportado (Q): a mayor Q, mayor deformación potencial.
- Temperatura de precalentamiento (T_0).
- Secuencia de soldadura.
- Tratamientos térmicos post-soldadura (PWHT).

4.3. Tipos de distorsión en soldaduras

- **Contracción transversal:** Acortamiento perpendicular al eje del cordón.
- **Contracción longitudinal:** Acortamiento paralelo al eje.
- **Distorsión angular:** Rotación de las piezas alrededor del eje del cordón (común en juntas en V).
- **Pandeo (buckling):** Inestabilidad elástica en chapas delgadas.
- **Alabeo (warping):** Deformación compleja en tres dimensiones.

4.4. Geometría de la pileta líquida

La forma de la pileta líquida (baño de fusión) influye en la penetración, el perfil del cordón y la solidificación. Depende de:
- Parámetros de soldadura (corriente, voltaje, velocidad).
- Tipo de proceso y polaridad.
- Composición del gas de protección.
- Conductividad térmica del material.

Una pileta alargada favorece la solidificación direccional, mientras que una pileta ancha puede dar lugar a grano equiaxial.

4.5. Control de la distorsión: técnicas y recomendaciones

4.5.1. Diseño de la junta y del cordón

- Usar el menor tamaño de cordón posible que cumpla los requisitos.
- Preferir juntas en X (doble V) o doble U para equilibrar contracciones.
- Seleccionar el tipo de bisel adecuado al espesor (ver tabla orientativa).
- Evitar cambios bruscos de sección.

4.5.2. Técnicas de proceso y secuencia

- **Paso peregrino (backstep sequence):** Soldar en dirección opuesta al avance general.
- **Simetría:** Alternar cordones a ambos lados del eje neutro.
- **Predeformación (preset):** Posicionar las piezas con un ángulo opuesto al esperado.
- **Secuencia constructiva:** Soldar primero los componentes más rígidos.

4.5.3. Restricción mecánica

- Uso de bridas, grampas y dispositivos de sujeción.
- Emplear respaldos (backing) para facilitar la penetración y reducir distorsión.

4.6. Eliminación de tensiones residuales (generalidades)

- **Martillado (peening):** Golpear la superficie del cordón para introducir tensiones de compresión superficiales. Debe controlarse para no dañar el metal.
- **Shot peening:** Similar con partículas.
- **Tratamiento térmico post-soldadura (PWHT):** Calentar la pieza a una temperatura controlada (por debajo de A_{c1}) y enfriar lentamente para aliviar tensiones. Obligatorio en muchos códigos para ciertos materiales y espesores.

4.7. Metodologías para el diseño y cálculo de uniones soldadas

Para el diseño de uniones soldadas se deben considerar las tensiones admisibles según el código aplicable (CIRSOC 304, AWS D1.1, etc.).

4.7.1. Sección resistente de un filete a 90°

La sección más solicitada es la garganta, que forma 45° con los catetos. La relación entre el cateto k (lado del filete) y la garganta a es:

$$a = k \cdot \sin(45°) = k \cdot 0,707$$

4.7.2. Tensiones admisibles (método ASD)

Según CIRSOC 304, para cargas estáticas, la tensión admisible en el filete (σ_{adm}) se toma como una fracción de la resistencia a la tracción del metal de aporte (R_T).

Tipo de unión	Tensión aplicada	Tensión admisible
JPC	Tracción normal al área	Igual al metal base
	Compresión normal	Igual al metal base
	Corte sobre área efectiva	$0,30 \times R_T$
JPP	Tracción normal	$0,30 \times R_T$
	Compresión normal (junta resistente)	$0,90 \times R_T$
	Compresión normal (junta no resistente)	$0,75 \times R_T$
	Corte paralelo	$0,30 \times R_T$
Filete	Corte en garganta	$0,30 \times R_T$

R_T: resistencia a la tracción del metal de aporte. Consultar CIRSOC 304 para condiciones específicas.

4.7.3. Ejemplo de cálculo

Problema: Una placa de 1000 kg (9810 N) está unida mediante dos cordones de filete de 10 cm de largo total (40 mm de longitud resistente efectiva por lado, $L_w = 40$ mm). Calcular el cateto necesario. Usar electrodo E6013 ($R_T = 430$ MPa).

1. Tensión admisible: $\sigma_{adm} = 0,3 \times 430 = 129$ MPa.
2. Área resistente necesaria: $A = F/\sigma_{adm} = 9810/129 = 76$ mm².
3. Garganta: $a = A/L_w = 76/40 = 1,9$ mm.
4. Cateto: $k = a/0,707 = 1,9/0,707 = 2,7$ mm.

Se necesita un filete de cateto aproximado 3 mm (en la práctica se usaría un mínimo constructivo de 4 mm).

4.8. Recomendaciones de diseño y tipos de biseles

La elección del bisel depende del espesor, proceso, posición y requisitos de penetración. A modo orientativo:

- Espesores <6 mm: junta a tope sin preparación.
- Espesores 3–15 mm: bisel en V simple, media V, o V con respaldo.
- Espesores >20 mm: biseles en U, J, doble V, doble U.
- Juntas en T o en ángulo: filetes o biseles en el borde del alma.

4.9. Vocabulario técnico y normas aplicables

- **Esfuerzo de fluencia (σ_y):** Valor a partir del cual el material deforma plásticamente.
- **Gradiente térmico:** Variación espacial de temperatura.
- **Tensión residual:** Tensión que permanece después de soldar.
- **PWHT:** Post-Weld Heat Treatment.
- **CIRSOC 304:** Reglamento argentino para estructuras de acero soldadas.
- **AWS D1.1:** Código de soldadura estructural (acero).
- **JPC / JPP:** Junta de penetración completa / parcial.
- **ASD / LRFD:** Métodos de diseño.

5. SOLDADURA MANUAL

5.1. Soldadura manual con electrodo consumible: Proceso SMAW

5.1.1. Definición y principios (AWS A3.0)

El proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding), también conocido como soldadura manual con electrodo revestido, produce la coalescencia de metales mediante el calor generado por un arco eléctrico entre un electrodo revestido consumible y la pieza de trabajo. No se aplica presión y el metal de aporte proviene del electrodo.

Componentes básicos del equipo:

- Fuente de poder de corriente constante (característica descendente).
- Electrodo revestido consumible.
- Pinza portaelectrodo y pinza de masa.
- Cables de soldadura.

Características generales:

- Proceso manual, versátil y de bajo costo de inversión.
- Facilidad de transporte y aplicación en trabajos de campo.
- Acceso a juntas en lugares restringidos.
- Gran disponibilidad de consumibles para todo tipo de aceros.
- Limitaciones: requiere alta capacitación del soldador, es discontinuo (cambio frecuente de electrodos) y difícil de automatizar.

5.1.2. Electrodos revestidos: fabricación

Los electrodos consisten en un alambre de acero (alma) recubierto por un revestimiento de materiales como carbonatos, óxidos, fluoruros, silicatos y celulosa como aglutinantes. Pueden contener elementos de aleación (ej. electrodos inoxidables sintéticos).

Método	Descripción
Extrusión	El revestimiento en pasta es extrudado sobre el alambre. Método más común.
Inmersión	El alambre se sumerge en el revestimiento líquido.
Prensado	El revestimiento en polvo se prensa alrededor del alambre.

Parámetros importantes:

- **Concentricidad:** El revestimiento debe estar centrado para mantener un arco estable.
- **Rendimiento:** Relación entre metal depositado y peso del electrodo consumido ($P_{depositado}/P_{electrodo}$).
- **Diámetro:** Se refiere al diámetro del alambre desnudo.

5.1.3. Funciones del revestimiento (AWS A5.1)

Funciones metalúrgicas:

- **Protección gaseosa:** Descomposición de celulosa ($C_6H_{10}O_5)_n$ genera H_2, CO, CO_2; carbonatos ($CaCO_3$) generan CO y CO_2.
- **Desulfuración:** FeS + CaO → CaS + FeO; o [S] + [Mn] → (MnS).
- **Desfosforación:** 2[P] + 5(OFe) + 4(OCa) → $(CaO)_4{\cdot}P_2O_5$ + 5Fe.
- **Desoxidación:** [Mn] + [O] → (MnO); [Si] + 2[O] → (SiO_2).
- **Formación de escoria:** Protege el cordón solidificado, retarda enfriamiento y permite salida de gases.
- **Aporte de elementos de aleación:** Mediante ferroaleaciones en el revestimiento.

Funciones eléctricas:

- Estabilización del arco mediante sustancias de bajo potencial de ionización (Na, K como silicatos, rutilo, zirconia).
- Determinación del tipo de corriente y polaridad adecuada.

Funciones sobre manipulación y cordón:

- **Entubamiento (copa):** El revestimiento se consume más lentamente, formando una copa que dirige el arco y las gotas.
- **Transferencia de calor:** Descomposición endotérmica de H_2, N_2 cerca del electrodo y recomposición exotérmica cerca de la pieza.
- **Soldadura en posición:** Escoria con punto de fusión ∼200 °C inferior al acero, viscosidad ∼7 Poises a 1450 °C.
- **Remoción de escoria:** Diferencia de coeficientes de contracción.
- **Forma del cordón y penetración:** La escoria moldea el cordón; los gases proyectan gotas a alta velocidad.

5.1.4. Reacciones metal-escoria y absorción de gases

- **Absorción de gases:** El metal fundido puede absorber H_2, N_2, O_2 de la atmósfera si no está protegido. El hidrógeno causa fisuración en frío; el oxígeno forma inclusiones; el nitrógeno reduce tenacidad.
- **Reacciones metal-escoria:** La escoria absorbe impurezas (S, P, O) y las retiene al solidificar. El índice de basicidad de Boniszewski mide la capacidad desulfurante/desfosforante.

5.1.5. Clasificación de electrodos (Norma AWS A5.1 / A5.1M)

Formato: **E XX Y Z**

- **E:** Electrodo.
- **XX:** Resistencia mínima a la tracción (ksi para A5.1, MPa para A5.1M). Ej: 60 = 60 ksi (420 MPa), 70 = 70 ksi (485 MPa).
- **Y:** Posición: 1 = todas, 2 = plana y horizontal, 4 = plana, horizontal, vertical descendente, sobrecabeza.
- **Z:** Tipo de revestimiento y corriente/polaridad.

Clas.	Revestimiento	Corriente y polaridad	Posición	Aplicaciones
E6010	Celulósico sódico	CC+ (DCEP)	Todas	Raíces en tuberías, alta penetración
E6011	Celulósico potásico	CA/CC+	Todas	Similar a E6010, útil con CA
E6012	Rutílico sódico	CA/CC–	Todas	Penetración media, buen aspecto
E6013	Rutílico potásico	CA/CC±	Todas	Arco suave, poca penetración, terminaciones
E7014	Rutílico con Fe	CA/CC±	Todas	Alto rendimiento, chapas finas
E7015	Básico sódico	CC+	Todas	Bajo H2, alta tenacidad
E7016	Básico potásico	CA/CC+	Todas	Bajo H2, buena tenacidad
E7018	Básico con Fe	CA/CC+	Todas	Bajo H2, alto rendimiento
E7024	Rutílico con Fe	CA/CC±	Plana/H	Alta velocidad deposición
E7028	Básico con Fe	CA/CC+	Plana/H	Bajo H2, filetes horizontales

5.1.6. Fuentes de poder y característica del arco en SMAW

- Requiere fuente de **corriente constante (CC / drooping)**: la corriente varía poco ante cambios de voltaje (longitud de arco), permitiendo al soldador controlar la distancia.
- **Ciclo de trabajo:** Porcentaje de tiempo en 10 minutos que la fuente puede operar a corriente nominal sin sobrecalentarse.

5.1.7. Variables operativas en SMAW

- Corriente de soldadura (amperaje).
- Voltaje (longitud de arco).
- Velocidad de avance.
- Ángulo de trabajo y ángulo de avance.
- Tipo y diámetro del electrodo.
- Técnica (empuje o arrastre).

5.1.8. Defectos típicos en SMAW

- Inclusión de escoria (mala limpieza entre pasadas).
- Socavado (exceso de amperaje, velocidad alta).
- Porosidad (humedad en revestimiento, arco largo).
- Falta de fusión (amperaje bajo, velocidad excesiva).

5.2. Soldadura manual con electrodo no consumible: Proceso GTAW

5.2.1. Fundamentos y definición (AWS A3.0)

El proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), o TIG (Tungsten Inert Gas), utiliza un electrodo no consumible de tungsteno y una protección gaseosa inerte (argón, helio o mezclas) para evitar la contaminación atmosférica. El arco se establece entre el electrodo y la pieza, fundiendo el metal base y, opcionalmente, metal de aporte.

5.2.2. Equipamiento y componentes

- Fuente de poder de corriente constante.
- Antorcha con electrodo de tungsteno, boquilla de gas y sistema de refrigeración (agua/aire).
- Gas de protección.
- Sistema de control de arco (alta frecuencia, pulsos).
- Metal de aporte (varillas según AWS A5.18, etc.).

Partes críticas de la antorcha:

- Electrodo de tungsteno.
- Boquilla (cerámica, sílice).
- Gas lens (regulariza flujo, reduce turbulencias).
- Collet y cuerpo del collet.
- Sistema de refrigeración.

5.2.3. Electrodos de tungsteno (AWS A5.12 / ISO 6848)

Los electrodos se clasifican por el óxido añadido, que mejora la emisión termoiónica y la vida útil.

Clasificación	Óxido	Color	Aplicación
EWP (WP)	Puro (sin óxido)	Verde	CA (Al, Mg). Punta bola
EWCe-2 (WCe20)	CeO_2 (2 %)	Gris	CC/CA, bajas corrientes, orbital
EWLa-1 (WLa10)	La_2O_3 (1 %)	Negro	Excelente encendido, no rad.
EWLa-1.5 (WLa15)	La_2O_3 (1,5 %)	Dorado	Mayor capacidad corriente
EWLa-2 (WLa20)	La_2O_3 (2 %)	Azul	Alta capacidad, CC/CA
EWTh-1 (WTh10)	ThO_2 (1 %)	Amarillo	Emisión mejorada, CC– (aceros)
EWTh-2 (WTh20)	ThO_2 (2 %)	Rojo	Alta emisión, punta afilada CC–
EWZr-1 (WZr3)	ZrO_2 (0,15–0,50 %)	Marrón	Resistente contamin., CA/CC
EWZr-8 (WZr8)	ZrO_2 (0,7–0,9 %)	Blanco	Alta resistencia, CA

Nota: Los electrodos toriados (Th) son radiactivos; evitar inhalar polvo de esmerilado. Los de lantano y cerio son sustitutos no radiactivos.

5.2.4. Fuentes de poder y diferencias entre polaridades

Característica	DCEN (CC–)	DCEP (CC+)	CA (AC)
Calor en la pieza	70 % (máx.)	30 % (mín.)	50 % / 50 %
Penetración	Profunda/ estrecha	Muy superficial	Media
Calor en el electrodo	Bajo (punta fría)	Alto (punta caliente)	Medio
Limpieza de óxidos	No	Sí (acción catódica)	Sí (en semiciclo +)
Forma de punta	Afilada	Redondeada (bola)	Redondeada (bola)
Aplicaciones típicas	Aceros, Ti, Cu	Muy poco usado	Al, Mg, aleaciones

Corriente pulsada (DC Pulsada): Cicla entre corriente de pico (alta, para fusión) y corriente de base (baja, para mantenimiento). Permite controlar aporte térmico, soldar chapas finas y mejorar estabilidad.

5.2.5. Gases de protección

Funciones: proteger electrodo y baño de fusión, influir en características del arco.

Gas	Características	Aplicaciones
Argón (Ar)	Bajo potencial de ionización, arco estable, fácil encendido. Caudal: 7–16 L/min	Más común. Perfil de penetración en çopa"
Helio (He)	Alta conductividad térmica, arco más caliente. Mayor voltaje. Caudal: 14–24 L/min	Metales alta conductividad (Al, Cu), grandes espesores
Mezclas Ar–He	Combinan estabilidad y penetración	Proporciones variables
Mezclas Ar–H_2	Hasta 5 % H_2, aumentan penetración	Aceros inoxidables, aleaciones de Ni
Gas de respaldo	Ar o mezclas inertes	Protección de raíz

Gas lens: Mejora laminaridad del flujo, permite mayor stick-out.

5.2.6. Técnicas y parámetros de control

- **Encendido:** Alta frecuencia (HF) sin contacto, o raspado (menos usado).
- **Preflujo:** Tiempo de gas antes de encender arco.
- **Postflujo:** Tiempo de gas después de apagar arco.
- **Control remoto:** Pedal o potenciómetro para ajustar corriente.
- **Balance de onda en CA:** Ajuste de tiempo de semiciclo positivo (limpieza) y negativo (penetración).

5.2.7. Clasificación de consumibles (AWS A5.18)

Aunque AWS A5.18 es específica para alambres de acero al carbono en GMAW, en GTAW se usan varillas de aporte clasificadas según la misma norma para aceros al carbono (ej. ER70S-2, ER70S-6). Para otros materiales existen normas específicas (AWS A5.7 para cobre, A5.10 para aluminio, etc.).

5.2.8. Ventajas y desventajas del GTAW

Ventajas:

- Soldadura de alta calidad, libre de salpicaduras.
- Apto para casi todos los metales.
- Excelente para raíces en tuberías.
- Bajo hidrógeno difusible.

Desventajas:

- Tasa de deposición baja.
- Requiere alta destreza.
- Sensible a corrientes de aire.
- Limpieza meticulosa previa.

5.2.9. Defectos típicos en GTAW

- Inclusiones de tungsteno (tocar el baño con electrodo).
- Porosidad (falta de protección, contaminación).
- Falta de fusión (corriente insuficiente).
- Socavado (exceso de corriente).
- Contaminación del electrodo.

5.3. Normas citadas

- AWS A3.0, AWS A5.1, AWS A5.5, AWS A5.12, AWS A5.18.
- CIRSOC 304.

6. SOLDADURA SEMI-AUTOMÁTICA (GMAW / FCAW / SAW)

6.1. Generalidades sobre procesos semiautomáticos

Los procesos de soldadura semiautomática utilizan alimentación continua del electrodo (alambre), lo que permite mayores velocidades de deposición y largos cordones sin interrupción. El soldador controla la pistola o cabezal, mientras que el equipo regula la alimentación y los parámetros. Los principales procesos son:

- **GMAW (Gas Metal Arc Welding):** Alambre macizo con gas de protección.
- **FCAW (Flux Cored Arc Welding):** Alambre tubular con fundente interno, con o sin gas auxiliar.
- **SAW (Submerged Arc Welding):** Arco sumergido bajo fundente granular, generalmente automático.

Proceso	Características	Aplicaciones
GMAW	Alambre macizo, gas activo/inerte, alta deposición, sin escoria.	Aceros C, inox., Al; producción en serie.
FCAW	Alambre tubular, c/ o s/ gas auxiliar, alta deposición, escoria protectora.	Estructuras, aceros C y baja aleación; campo y taller.
SAW	Arco bajo fundente, alta calidad, sin radiación, solo plana/horizontal.	Recipientes a presión, vigas, tuberías gral.; uniones largas.

6.2. Equipos y fuentes de poder

6.2.1. Equipamiento común

- Fuente de poder (generalmente de voltaje constante).
- Alimentador de alambre (wire feeder) de velocidad regulable.
- Pistola o antorcha con boquilla de gas y tubo de contacto.
- Sistema de suministro de gas (cilindro, regulador, caudalímetro).
- Alambre electrodo (sólido o tubular) en bobinas.
- (Opcional) Sistema de refrigeración para altas corrientes.

6.2.2. Fuentes de poder y características del arco

Los procesos semiautomáticos requieren fuentes de **voltaje constante (VC)** o de característica plana. Esto permite la autorregulación del arco: si la longitud del arco aumenta, la corriente disminuye, reduciendo la velocidad de fusión y acortando el arco nuevamente, manteniéndolo estable.

- **Voltaje constante:** La tensión se mantiene casi invariable ante cambios de corriente. Pequeñas variaciones en la distancia electrodo-pieza provocan grandes cambios de corriente, ajustando la velocidad de fusión.
- **Corriente constante:** No es adecuada para GMAW/FCAW porque no autorregula; se usa en procesos manuales como SMAW.

Ciclo de trabajo: Las fuentes para semiautomática suelen tener altos ciclos de trabajo (60–100 %) para operación continua.

6.3. Mecanismo de transferencia del metal en GMAW

El modo en que el metal se transfiere desde el alambre a la pieza depende de la corriente, voltaje, diámetro del alambre y composición del gas. Los principales modos son:

- **Cortocircuito (Short circuit):** A bajas corrientes y voltajes. El alambre toca la pileta, se funde y se separa en cortocircuitos repetitivos (50–200 Hz). Bajo aporte térmico, ideal para chapas finas y todas posiciones. Típico con CO_2 o mezclas pobres en Ar.
- **Globular:** A corrientes medias. Gotas de diámetro mayor al alambre caen por gravedad. Arco inestable, muchas salpicaduras. No recomendado para calidad.
- **Spray (axial):** A corrientes altas (por encima de la corriente de transición). Gotas finas proyectadas axialmente a alta velocidad. Arco estable, sin salpicaduras, excelente aspecto. Requiere gas con alto contenido de Ar (>80 %). Solo posición plana/horizontal.
- **Spray pulsado (GMAW-P):** Variante donde la corriente pulsa entre un nivel alto (pico) y uno bajo (base). En cada pulso se desprende una gota controlada. Permite spray a corrientes medias, con menor aporte térmico y aplicable a todas posiciones.
- **STT (Surface Tension Transfer):** Tecnología que controla la corriente durante el cortocircuito mediante la detección de la tensión superficial, minimizando salpicaduras.

Modo	Corriente	Gas típico	Aporte térmico	Posiciones
Cortocircuito	Baja	CO_2, Ar+CO_2	Bajo	Todas
Globular	Media	CO_2	Medio	Plana/ Horizontal
Spray	Alta	Ar (>80 %)	Alto	Plana/ Horizontal
Spray Pulsado	Media	Ar, Ar+He	Medio	Todas (con control)

6.4. Gases de protección

Los gases cumplen múltiples funciones: proteger la pileta, ionizarse para mantener el arco, controlar el modo de transferencia, y afectar la penetración y propiedades mecánicas.

Gas	C. térmica [mW/m·K]	Densidad (aire=1)	Peso mol. [g/mol]	Potencial ioniz. [eV]
CO_2	14,67	1,53	44	14,4
Ar	16,48	1,38	40	15,8
He	146,2	0,144	4	24,5
N_2	24,23	0,967	28	15,0
H_2	173,0	0,069	2	13,5

Influencias específicas:

- **Argón (Ar):** Bajo potencial de ionización, arco estable. Permite modo spray. Penetración en "dedo". Mezclado con O_2 (2–5 %) mejora fluidez en aceros.
- **CO_2:** Activo, se disocia endotérmicamente en el arco y se recombina exotérmicamente en la pieza, aportando calor adicional. Penetración ancha. Produce más salpicaduras. Económico.
- **Mezclas Ar–CO_2:** Balance entre estabilidad y penetración. Proporciones típicas: 75 % Ar + 25 % CO_2 (acero estructural), 90 % Ar + 10 % CO_2 (menos salpicaduras).
- **Helio (He):** Alta conductividad térmica, arco más caliente y ancho. Se usa en mezclas para metales de alta conductividad (Al, Cu).
- **Nitrógeno (N_2):** En mezclas para aceros inoxidables dúplex (ayuda a formación de austenita).

El gas influye en la composición química del metal depositado (pérdida de elementos aleantes) y en las propiedades mecánicas (resistencia, tenacidad).

6.5. Variables operativas en procesos semiautomáticos

Variable	Efecto / Rango típico
Corriente (I)	Controla la velocidad de fusión y el modo de transferencia.
Voltaje (V)	Determina la longitud del arco y el ancho del cordón.
Velocidad de alimentación (WFS)	Ajusta la corriente; a mayor WFS, mayor I.
Stick-out (extensión libre)	10–20 mm; aumenta con la resistencia y la tasa de deposición.
Caudal de gas	15–25 L/min; debe ser laminar para proteger.
Ángulo de trabajo	Influye en la penetración y el perfil.

Consideraciones adicionales:

- La **velocidad de alimentación del alambre (WFS)** es el principal control de la corriente. En equipos sinérgicos, el WFS ajusta automáticamente el voltaje.
- El **stick-out** excesivo (>25 mm) puede causar sobrecalentamiento y falta de fusión.
- El **caudal de gas** debe ser suficiente para proteger pero sin turbulencias; flujo turbulento aspira aire y causa porosidad.
- La **polaridad** habitual es DCEP (CC+) para GMAW y la mayoría de FCAW. DCEN se usa en casos especiales (ej. algunos alambres autoprotegidos).

6.6. Clasificación de electrodos según normas AWS

6.6.1. Alambre sólido para GMAW (AWS A5.18)

La designación sigue el formato **ER XX S - Y**:

- **ER:** Electrodo o varilla.
- **XX:** Resistencia mínima a la tracción en ksi (70, 80, etc.).
- **S:** Sólido.
- **Y:** Nivel de desoxidantes (2, 3, 4, 6, 7). A mayor número, mayor contenido de Mn y Si (mejor desoxidante).

Clasificación	Resistencia (ksi)	Tipo	Aplicación
ER70S-2	70	Sólido	Aceros al carbono, alto contenido desoxidante (apto para acero con óxido)
ER70S-3	70	Sólido	Aplicaciones generales, buena calidad de cordón
ER70S-6	70	Sólido	Alto contenido de Mn y Si, mejor desoxidante, apto para chapas con óxido
ER80S-D2	80	Sólido	Aceros de baja aleación (Mn-Mo)

6.6.2. Alambre tubular para FCAW (AWS A5.20 / A5.20M)

Formato: **E XX T - Y Z - HZ J / D / Q**

- **E:** Electrodo.
- **XX:** Resistencia mínima a la tracción (ksi o MPa).
- **T:** Tubular.
- **Y:** Posición (0 = plana/horizontal, 1 = todas).
- **Z:** Usabilidad (1 a 14 o G). Indica tipo de escoria, polaridad, características operativas.
  - **1:** Rutilico, con gas, todas posiciones.
  - **5:** Básico, con gas, alta tenacidad.
  - **8:** Autoprotegido, todas posiciones.
  - **G:** General (no especificado).
- **Gas (opcional):** C = 100 % CO_2, M = mezcla Ar–CO_2 (75–80 % Ar). Si no aparece, es autoprotegido.
- **Suplementarios:** H4, H8, H16 (hidrógeno difusible), J (tenacidad mejorada), D/Q (propiedades mecánicas suplementarias).

Design.	Resist.	Pos.	Gas	Características
E71T-1	70 ksi	Todas	CO_2/mezcla	Rutílico, todas pos., buena apariencia
E71T-5	70 ksi	Todas	CO_2/mezcla	Básico, alta tenac., escoria fácil remoción
E71T-8	70 ksi	Todas	Autoprot.	Alta resist. mec., estructuras
E71T-11	70 ksi	Todas	Autoprot.	Baja penetración, chapas finas
E70T-1	70 ksi	Plana/H	CO_2/mezcla	Alta vel. depos., filetes

6.6.3. Alambre para SAW (AWS A5.17 / A5.23)

La clasificación combina el fundente y el alambre. Ejemplo: **F7A2-EM12K** donde:

- **F:** Fundente.
- **7:** Resistencia mínima a la tracción (70 ksi).
- **A:** Condición de tratamiento térmico (A = como se suelda, P = PWHT).
- **2:** Tenacidad (Charpy a –20 °F, etc.).
- **EM12K:** Designación del alambre (composición química).

Clasificación	Tipo	Aplicación
F7A2-EM12K	Alambre EM12K, fundente F7A2	Aceros al carbono, alta resistencia
F7A4-EM12K	Alambre EM12K, fundente F7A4	Alta velocidad, buena tenacidad
F8A2-EG	Alambre de aleación, fundente básico	Aceros de baja aleación

6.7. Ventajas y limitaciones de los procesos semi-automáticos

Ventajas comunes:

- Mayor velocidad de deposición que SMAW.
- Soldaduras continuas (sin cambio de electrodo).
- Menor necesidad de limpieza (especialmente GMAW).
- Adecuados para automatización y robotización.
- Menor destreza requerida (autorregulación del arco).

Limitaciones:

- Equipo más complejo y costoso.
- Sensibles a corrientes de aire (excepto SAW y FCAW autoprotegido en ciertas condiciones).
- Mayor radiación por altas corrientes.
- Requieren buena limpieza previa (especialmente GMAW).
- Riesgo de falta de fusión si los parámetros no son adecuados.
- SAW solo en posición plana/horizontal.

6.8. Normas citadas

- AWS A3.0, A5.18, A5.20, A5.17, A5.23.

7. SOLDABILIDAD EN ACEROS

7.1. Concepto de soldabilidad (ISO TR 581)

Definición: Un material metálico es soldable para un proceso dado si se puede obtener continuidad metálica con un procedimiento adecuado y las uniones cumplen los requisitos de servicio.

Factores que gobiernan la soldabilidad:

- **Material:** Composición química, propiedades mecánicas, microestructura.
- **Diseño:** Geometría de la junta, rigidez, espesores.
- **Producción:** Proceso, parámetros, precalentamiento, consumibles.

7.2. Problemas y fisuras en soldadura de aceros al carbono y aleados

7.2.1. Fisuración en caliente (Hot cracking)

Ocurre durante la solidificación, a temperaturas cercanas al solidus.
Causas:

- Segregación de elementos de bajo punto de fusión (S, P, B).
- Tensiones de contracción durante la solidificación.
- Morfología de la solidificación (columnar vs. equiaxial).

Prevención:

- Bajo contenido de S y P.
- Relación Mn/S adecuada (> 20 para evitar FeS).
- Control de la forma del cordón (relación ancho/profundidad).
- Uso de metal de aporte con ferrita delta (en inoxidables).

7.2.2. Fisuración en frío (Cold cracking / Hydrogen Induced Cracking)

Ocurre después de la solidificación, a temperaturas <200°C. Requiere tres factores concurrentes:

- Hidrógeno difusible en el metal (H_2).
- Microestructura dura y frágil (martensita).
- Tensiones de tracción (residuales o aplicadas).

Prevención:

- Electrodos de bajo hidrógeno (estufado a 250–350°C).
- Precalentamiento para reducir velocidad de enfriamiento.
- Control de aporte térmico.
- Tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) para aliviar tensiones y revenir martensita.

Característica	Fisuración en caliente	Fisuración en frío
Temperatura	Cerca del solidus (>1000°C)	<200°C (post-solidificación)
Mecanismo	Películas líquidas en bordes de grano por segregación (S, P)	Hidrógeno difusible + microestructura dura (martensita) + tensiones
Aspecto	Intergranular, superficies oxidadas	Generalmente transgranular, superficie limpia
Prevención	Bajo S y P, relación Mn/S adecuada	Electrodos bajo H, precalentamiento, PWHT

7.3. Carbono equivalente (CEV)

Permite estimar la templabilidad y la tendencia a la fisuración en frío.

Método	Fórmula
IIW (C-Mn)	$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$
CET (Alta resist.)	$CET' = C + \frac{10}{Si} + \frac{Mn}{30} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{50} + \frac{V}{15} + 5B$
Pcm (Bajo C)	$P_{cm} = C + \frac{30}{Si} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{60} + \frac{Ni}{50} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$

Interpretación general (IIW):

- $CE < 0,40$: Buena soldabilidad, sin precauciones especiales.
- $CE = 0,40 - 0,60$: Posible necesidad de precalentamiento.
- $CE > 0,60$: Requiere precalentamiento y control estricto.

7.4. Fundamentos de tratamientos térmicos en soldadura

7.4.1. Precalentamiento

Objetivos:

- Reducir la velocidad de enfriamiento, evitando formación de martensita.
- Facilitar la difusión del hidrógeno fuera de la zona soldada.
- Disminuir tensiones térmicas.
- Ensanchar la ZAC, mejorando la tenacidad.

Métodos de cálculo de temperatura de precalentamiento:

- Basados en CEV y espesor (tablas de códigos como AWS D1.1, CIRSOC 304).
- Métodos analíticos (ej. fórmula de Seferian).
- Ensayos de soldabilidad (ensayo de implantación, CTS, etc.).

CEV	Espesor (mm)	Temperatura mínima de precalentamiento (°C)
<0,40	<20	Sin precalentar
0,40–0,45	20–40	50–100
0,45–0,50	20–40	100–150
0,50–0,60	>20	150–200
>0,60	cualquier	>200

Valores orientativos. Consultar código específico (AWS D1.1, CIRSOC 304, etc.).

7.4.2. Tratamiento térmico post-soldadura (PWHT)

- **Alivio de tensiones:** Calentar a 550–650°C (por debajo de A_{c1}), mantener y enfriar lento. Reduce tensiones residuales y revenido de martensita.
- **Normalizado:** Calentar sobre A_{c3}, enfriar al aire. Refina grano.
- **Recocido:** Para ablandar y mejorar ductilidad.

Aplicación obligatoria en muchos códigos para ciertos materiales y espesores (ej. recipientes a presión, aceros aleados).

7.5. Soldadura en aceros inoxidables y disímiles

7.5.1. Clasificación de aceros inoxidables

Tipo	Series	Características	Soldabilidad
Ferríticos	400 (409, 430)	Magnéticos, bajo C, resistencia a corrosión	Crecimiento grano ZAC, pérdida tenacidad. Precalentar para evitar fragilidad.
Martensíticos	400 (410, 420)	Magnéticos, templables, alto C	Riesgo fisuración frío. Requieren precalentamiento y PWHT obligatorio.
Austeníticos	300 (304, 316)	No magnéticos, buena tenacidad, no templables	Buena soldabilidad, pero riesgo fisuración caliente y sensibilización.
Dúplex	2205, 2507	Mezcla austenita + ferrita, alta resistencia	Control estricto ciclo térmico para mantener equilibrio fases.

7.5.2. Dilución en soldadura de inoxidables

La dilución determina la composición final del metal de soldadura y, por tanto, su microestructura. En juntas disímiles (ej. acero al carbono con inoxidable), la dilución puede generar martensita en la zona mezclada.

7.5.3. Diagramas de Schaeffler y WRC-1992

Permiten predecir la microestructura del metal de soldadura en función de la composición del metal base y aporte.

Diagrama	Ecuaciones	Aplicación
Schaeffler	$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1{,}5Si + 0{,}5Nb$ $Ni_{eq} = Ni + 30C + 0{,}5Mn$	Clásico para predecir microestructura en soldaduras de inoxidables
WRC-1992	$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0{,}7Nb$ $Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0{,}25Cu$	Más preciso para aceros dúplex y contenido de ferrita

Uso práctico:

1. Calcular Cr_{eq} y Ni_{eq} del metal base y del aporte.
2. Ubicar en el diagrama.
3. Para mezclas, usar regla de mezclas según dilución.
4. Seleccionar aporte que dé microestructura deseada (evitar martensita, controlar ferrita).

En AWS A5.4 (electrodos para inoxidables), se especifica el rango de ferrita para cada clasificación (ej. E308-16 puede tener 4–12

7.5.4. Problemas específicos en inoxidables

Problema	Descripción y prevención
Sensibilización	Precipitación de carburos de Cr en bordes de grano (450–850°C). Prevención: aceros bajo C (L) o estabilizados (Ti, Nb).
Fisuración en caliente	En austeníticos por bajo punto de fusión de segregaciones (S, P). Prevención: control de composición y ferrita delta (∼5–10 %).
Fragilización sigma	Formación de fase σ (FeCr) en ferríticos y dúplex (600–900°C). Reduce tenacidad y resistencia a corrosión.
Corrosión intergranular	Consecuencia de la sensibilización.

7.5.5. Soldadura de aceros disímiles

Cuando se sueldan aceros de diferente composición (ej. acero al carbono con inoxidable), se deben considerar:

- Dilución y microestructura resultante (uso de diagramas).
- Diferentes coeficientes de dilatación térmica.
- Migración de carbono desde el acero al carbono hacia el inoxidable (descarburación en un lado, carburación en el otro).
- Selección del metal de aporte adecuado (generalmente sobresaleado, como 309 o 309L).

Combinación	Riesgo	Metal de aporte recomendado
Acero C + Inox. austenítico	Formación de martensita en zona diluida	Austeno-ferrítico (ej. 309, 309L)
Acero C + Inox. ferrítico	Crecimiento de grano y fragilidad	Austenítico o de alta aleación
Inox. austenítico + ferrítico	Diferente dilatación térmica	Según diagrama, buscar ferrita controlada

7.6. Soldabilidad por tipo de acero inoxidable

7.6.1. Aceros ferríticos

- Buena resistencia a la corrosión, pero crecimiento de grano en ZAC.
- Pérdida de tenacidad en ZAC por engrosamiento de grano.
- Precalentar (100–200°C) para evitar fisuración, pero evitar sobrecalentamiento que engrane aún más.
- Usar bajo aporte térmico.

7.6.2. Aceros martensíticos

Alta templabilidad → formación de martensita frágil.

- Requieren precalentamiento (200–300°C) y mantenimiento de temperatura entre pasadas.
- PWHT obligatorio (revenido a 600–750°C) para mejorar tenacidad.
- Usar electrodos de bajo hidrógeno.

7.6.3. Aceros austeníticos

- Buena soldabilidad general.
- Riesgo de fisuración en caliente si la composición es desfavorable (S, P altos, o estructura completamente austenítica sin ferrita).
- Se recomienda contenido de ferrita delta de 5–10
- Sensibilización en el rango 450–850°C → usar aceros con bajo C (L) o estabilizados.
- No requieren precalentamiento (excepto para espesores grandes o alta restricción).

7.6.4. Aceros dúplex

- Mezcla de ferrita y austenita (∼50/50).
- Alta resistencia y resistencia a corrosión bajo tensión.
- El ciclo térmico debe controlarse para mantener el equilibrio de fases (evitar exceso de ferrita o precipitación de fases frágiles).
- Rango de temperatura entre pasadas limitado (ej. <150°C).
- Aporte térmico controlado (ni muy bajo ni muy alto).

7.7. Normas citadas

- ISO TR 581: Soldabilidad.
- AWS A5.4: Electrodos para aceros inoxidables.
- AWS D1.1, CIRSOC 304: Códigos de construcción.
- Diagramas de Schaeffler y WRC-1992 (publicaciones IIW/AWS).

8. SOLDABILIDAD EN FUNDICIONES FERROSAS Y NO FERROSAS

8.1. Soldadura de las fundiciones

8.1.1. Clasificación de las fundiciones

Las fundiciones son aleaciones Fe-C con contenido de carbono >2

Tipo	Microestructura característica	Soldabilidad
Fundición gris	Grafito laminar en matriz ferrítica/perlítica	Mala (el grafito actúa como concentrador de tensiones, carbono libre)
Fundición nodular (dúctil)	Grafito esferoidal	Mejor que la gris, mayor tenacidad
Fundición maleable	Grafito en agregados compactos (obtenido por TT)	Similar a nodular
Fundición blanca	Cementita (Fe_3C) sin grafito libre	Muy mala, extremadamente frágil, casi no soldable
Fundición aleada	Con elementos aleantes (Ni, Cr, Mo)	Variable según composición

8.1.2. Carbono equivalente en fundiciones

El carbono equivalente en fundiciones relaciona la tendencia a formar grafito vs. cementita durante la solidificación:

Fórmula	Aplicación
$CE = C + \frac{Si}{3}$	Fundiciones grises (aproximación simple)
$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{P}{2}$	Fundiciones nodulares (más precisa)

Un CE alto ($> 4,3\,\%$) indica tendencia a grafito libre (mejor maquinabilidad, pero menor resistencia). En soldadura, un CE alto implica mayor contenido de carbono que puede formar martensita en la ZAC.

8.1.3. Preparación de juntas y su influencia

La preparación adecuada de la junta es crítica para evitar defectos:

Técnica	Descripción
Biselado en U o V ancho	Reduce la dilución y evita carburación excesiva
Limpieza profunda	Eliminar grafito superficial (cepillo, desengrasante)
Perforaciones previas	En grietas, perforar extremos para evitar propagación
Preparación en çola de milano"	Para insertos o parches

8.1.4. Materiales de aporte

Los electrodos para fundiciones se clasifican según AWS A5.15:

Tipo de electrodo	Composición	Aplicación
Níquel puro (ENiCI)	95-99 % Ni	Soldadura en frío, maquinable
Níquel-hierro (ENiFe-CI)	45-60 % Ni, balance Fe	Mayor resistencia, para uniones disímiles
Níquel-cobre (ENiCu)	Ni-Cu (Monel)	Resistencia a corrosión
Acero (ESt)	Acero al carbono	Solo para soldadura en caliente
Bronce (ECuSn)	Cu-Sn	Brazing o recubrimientos

Clasificación según AWS A5.15.

8.1.5. Técnicas de soldadura

Existen dos enfoques principales para soldar fundiciones:

Técnica	Procedimiento	Aplicaciones
Soldadura en frío	Sin precalentamiento, cordones cortos (2-4 cm), martilleado inmediato	Reparaciones locales, fundiciones grises y nodulares
Soldadura en caliente	Precalentamiento 500-650°C, mantenimiento entre pasadas, enfriamiento lento (horno/aislante)	Piezas grandes, uniones estructurales
Brazing	Con aporte de bronce o plata, T <900°C	Uniones no estructurales, recuperación de dimensiones

8.1.6. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos post-soldadura mejoran las propiedades y alivian tensiones:

Tratamiento	Objetivo y aplicación
Recocido completo	Calentar $>A_{c1}$, enfriar lento. Elimina tensiones, ablanda ZAC.
Normalizado	Calentar $>A_{c3}$, enfriar al aire. Refina grano en fundiciones maleables.
Revenido	Calentar $<A_{c1}$. Alivia tensiones sin modificar estructura.
Enfriamiento lento post-soldadura	Envolver en lana de vidrio o enterrar en arena caliente. Evita fisuración por enfriamiento rápido.

8.2. Soldadura en Aluminio y sus aleaciones

8.2.1. Generalidades

El aluminio y sus aleaciones presentan desafíos específicos debido a:
- Capa de óxido refractario (Al_2O_3).
- Alta conductividad térmica (requiere mayor aporte de calor).
- Alto coeficiente de dilatación (riesgo de distorsión).
- Solubilidad de hidrógeno (riesgo de porosidad).
- Rango de solidificación que puede causar fisuración en caliente.

8.2.2. Clasificación de aleaciones de aluminio

Serie	Elementos principales	Tratable térmicamente	Soldabilidad
1xxx	Al 99 % mínimo	No	Excelente
2xxx	Al-Cu	Sí	Pobre (fisuración)
3xxx	Al-Mn	No	Buena
4xxx	Al-Si	No	Buena (aporte)
5xxx	Al-Mg	No	Buena a excelente
6xxx	Al-Mg-Si	Sí	Buena (con control)
7xxx	Al-Zn	Sí	Pobre a regular

8.2.3. Problemas en la soldadura del aluminio

Problema	Descripción y prevención
Capa de óxido (Al_2O_3)	Refractaria ($T_f \approx 2050$°C), aísla eléctricamente. Prevención: limpieza mecánica (cepillo inox), química (desengrase), uso de corriente alterna (CA) en GTAW para efecto de limpieza catódica.
Porosidad por hidrógeno	Alta solubilidad de H en Al líquido, disminuye bruscamente al solidificar. Prevención: materiales secos, limpieza, evitar contaminación.
Fisuración en caliente	En aleaciones tratables térmicamente (2xxx, 6xxx, 7xxx). Prevención: aporte adecuado (serie 4xxx o 5xxx), control de dilución, evitar restricción excesiva.
Pérdida de resistencia en ZAC	En aleaciones tratables térmicamente, el calor sobreenvejece o disuelve precipitados. Recuperación con TT post-soldadura.

8.2.4. Fisuración en caliente: causas

La fisuración en caliente en aluminio ocurre durante la solidificación, cuando:
- Hay un amplio rango de solidificación (aleaciones tratables térmicamente).
- Presencia de eutécticos de bajo punto de fusión.
- Tensiones de contracción.
- Baja cantidad de eutéctico para .ªlimentar"las zonas interdendríticas.

Prevención:
- Selección adecuada del metal de aporte (serie 4xxx o 5xxx según aleación base).
- Control de la dilución.
- Evitar juntas muy restringidas.
- Usar técnicas que minimicen tensiones (secuencia, precalentamiento).

8.2.5. Soldabilidad de aleaciones tratables térmicamente

Las aleaciones de las series 2xxx, 6xxx y 7xxx obtienen su resistencia por precipitación. La soldadura afecta esta condición:

Aleación	Problemas	Recomendaciones
2xxx (Al-Cu)	Alta fisuración en caliente	Usar aporte 4xxx (Al-Si), control estricto de dilución, evitar restricción
6xxx (Al-Mg-Si)	Fisuración moderada, pérdida de resistencia en ZAC	Aporte 4043 o 5356, precalentar (100-150°C), TT post-soldadura (revenido)
7xxx (Al-Zn)	Muy alta fisuración, sensible a corrosión bajo tensión	Generalmente no recomendable soldar. Usar procesos especiales y aportes 5xxx.

8.2.6. Soldadura en aleaciones no tratables térmicamente

Las series 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx (bajo Mg) se endurecen por deformación. La soldadura produce un ablandamiento en la ZAC, pero generalmente son más fáciles de soldar:

Aleación	Características	Recomendaciones
1xxx (Al puro)	Excelente soldabilidad, baja resistencia	Aporte 1100 o 4043
3xxx (Al-Mn)	Buena soldabilidad, resistencia media	Aporte 4043 o 5356
4xxx (Al-Si)	Buena fluidez, usado como aporte	–
5xxx (Al-Mg)	Excelente soldabilidad, resistencia aumenta con Mg	Aporte del mismo grupo (5356, 5183). Controlar Mg $< 3,5\,\%$ si hay riesgo de corrosión bajo tensión.

8.2.7. Brazing en aluminio

El brazing de aluminio se utiliza para unir componentes de pared delgada, intercambiadores de calor, etc. Requiere control preciso de temperatura y ambiente:

Método	Fundente	Aplicaciones
Con fundente	Sales de cloruros y fluoruros (KCl-NaCl, NaF, KF-AlF_3)	Intercambiadores de calor, uniones en atmósfera abierta
Atmósfera controlada	Gas inerte con bajo punto de rocío	Piezas de precisión, sin residuos de fundente
Vacío	10^{-5} Torr	Aeroespacial, componentes electrónicos

Metales de aporte típicos: BAlSi (ej. 4047, 4043) según AWS A5.8.

Los metales de aporte típicos son de la serie BAlSi (ej. BAlSi-2, BAlSi-4) según AWS A5.8, con rangos de fusión entre 580-610°C.

8.3. Consideraciones generales sobre metales de aporte para aluminio

Serie AWS	Composición	Aplicación
ER1100	Al 99 % mínimo	Al puro (1xxx)
ER4043	Al-5 %Si	Aleaciones 3xxx, 6xxx, buena fluidez, reduce fisuración
ER4047	Al-12 %Si	Muy fluido, para brazing y aleaciones con Si
ER5183	Al-4.5 %Mg-0.7 %Mn	Aleaciones 5xxx (alta resistencia)
ER5356	Al-5 %Mg	Aleaciones 5xxx y 6xxx
ER5554	Al-3 %Mg	Aleaciones 5xxx con Mg medio
ER5556	Al-5 %Mg-0.8 %Mn	Alta resistencia

Según AWS A5.10.

8.4. Normas citadas

- AWS A5.15: Electrodos para fundiciones.
- AWS A5.10: Alambres y varillas para aluminio.
- AWS A5.8: Metales de aporte para brazing.
- AWS D1.2: Código de soldadura estructural para aluminio.

8.5. Tips de examen

- La soldadura en frío de fundiciones usa electrodos de níquel porque el níquel absorbe carbono y forma grafito, evitando martensita.
- En aluminio, la porosidad por hidrógeno es el defecto más común. La fuente principal de hidrógeno es la humedad en la capa de óxido.
- Para aleaciones 6xxx, el aporte 4043 (Al-5 %Si) reduce fisuración, pero puede causar pérdida de resistencia. El aporte 5356 (Al-5 %Mg) da mayor resistencia pero más riesgo de fisuración.
- El brazing de aluminio requiere fundentes agresivos (cloruros/fluoruros) que deben eliminarse post-soldadura para evitar corrosión.

9. CONTROLES Y ENSAYOS EN SOLDADURAS

9.1. Control de calidad en soldadura

El control de calidad en soldadura abarca todas las actividades planificadas y sistemáticas necesarias para garantizar que una unión soldada cumpla los requisitos especificados. Se divide en tres etapas:

- **Control previo a la soldadura:** Verificación de materiales (certificados, identificación), preparación de bordes, consumibles (almacenamiento, estufado), equipos (calibración), procedimiento (WPS) y calificación de soldadores.
- **Control durante la soldadura:** Supervisión de parámetros (corriente, voltaje, velocidad), condiciones ambientales, técnica del soldador, limpieza entre pasadas.
- **Control posterior a la soldadura:** Inspección visual, ensayos no destructivos (END), ensayos destructivos, documentación de resultados.

9.2. Clasificación de defectos típicos

Los defectos en soldaduras se clasifican según normas como ISO 6520 o AWS A3.0. Los principales grupos son:

Código	Tipo de defecto	Criterio de aceptación (ejemplo)
ASME VIII Div.1	Fisuras	No permitidas fisuras en soldaduras de recipientes.
AWS D1.1	Porosidad	En soldadura a tope, porosidad radiográfica no debe exceder tamaño/distribución (ej. diámetro máx. 1/16.º 1.6 mm).
API 1104	Falta de penetración	En tuberías, longitud acumulada de falta de penetración interna limitada según diámetro.
ISO 5817	Socavado	Profundidad máxima según nivel calidad (B, C, D). Ej. nivel B: $\leq$ 0.5 mm.

Nota: Criterios orientativos. Consultar norma aplicable.

9.3. Ensayos mecánicos sobre soldaduras

Los ensayos mecánicos permiten evaluar las propiedades de la unión soldada y son fundamentales para la calificación de procedimientos (PQR) y de soldadores (WPQ).

Ensayo	Norma típica	Qué mide	Aplicación
Tracción	AWS B4.0, ISO 4136	Resistencia a la tracción, límite de fluencia, elongación	Calificación de procedimientos y materiales
Doblado	AWS B4.0, ISO 5173	Ductilidad y solidez de la unión	Detección de falta de fusión o porosidad en cara y raíz
Impacto (Charpy)	AWS B4.0, ISO 9016	Tenacidad (energía absorbida), temperatura de transición	Aceros de alta resistencia, zonas críticas (ZAC)
Dureza	ISO 9015	Perfil de dureza en ZAC y metal depositado	Evaluar riesgo de fisuración, revenido, etc.
Macrografía	ISO 17639	Examen visual a baja aumento de la estructura	Ver penetración, zonas, defectos internos

9.4. Ensayos no destructivos (END) de normal utilización

Los END permiten detectar discontinuidades sin dañar la pieza. Los métodos más comunes en soldadura son:

Método	Principio	Aplicaciones	Limitaciones
Visual (VT)	Inspección directa o con instrumentos	Defectos superficiales, geometría, aspecto	Solo superficial, requiere acceso y buena iluminación
Líquidos penetrantes (PT)	Capilaridad de líquido coloreado/fluorescente	Fisuras superficiales en materiales no porosos	Solo superficial, requiere limpieza, no aplicable en materiales porosos
Partículas magnéticas (MT)	Atracción de partículas por campo magnético	Defectos superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos	Solo ferromagnéticos, requiere desmagnetización posterior
Radiografía (RT)	Absorción diferencial de rayos X o gamma	Defectos internos (poros, inclusiones, fisuras, falta de penetración)	Radiación ionizante, costoso, requiere interpretación, no detecta fisuras finas orientadas
Ultrasonido (UT)	Reflexión de ondas sonoras de alta frecuencia	Defectos internos, medición de espesores, caracterización de discontinuidades	Requiere acoplamiento, superficie regular, interpretación especializada

9.4.1. Inspección visual (VT)

Es el método más simple y económico. Requiere buena iluminación, conocimiento de los criterios de aceptación y, en muchos casos, instrumentos de medición (calibres, galgas).

9.4.2. Líquidos penetrantes (PT)

Se aplica un penetrante, se remueve el exceso y se aplica un revelador. Las discontinuidades abiertas a la superficie muestran indicaciones coloreadas (en penetrantes visibles) o fluorescentes (bajo luz UV).

9.4.3. Partículas magnéticas (MT)

Se magnetiza la pieza y se aplican partículas magnéticas (secas o húmedas). Las discontinuidades perpendiculares al campo generan fugas de flujo que atraen las partículas.

9.4.4. Radiografía industrial (RT)

Utiliza rayos X o gamma para obtener una imagen de la estructura interna. Las discontinuidades aparecen como áreas más oscuras (menor absorción) en la película o detector digital. Es especialmente sensible a poros, inclusiones y falta de penetración, pero menos a fisuras finas si no están orientadas favorablemente.

9.4.5. Ultrasonido (UT)

Emplea ondas sonoras de alta frecuencia (0.5–20 MHz). Un transductor envía pulsos y recibe ecos de las discontinuidades. Permite determinar posición, tamaño y orientación. Requiere personal entrenado y superficies de acoplamiento adecuadas.

9.5. Criterios de aceptación según principales códigos constructivos

Cada código o norma establece límites de aceptación para los defectos detectados, según el tipo de estructura y su criticidad. A continuación se presentan ejemplos orientativos:

Código	Tipo de defecto	Criterio de aceptación (ejemplo)
ASME VIII Div.1	Fisuras	No permitidas fisuras en soldaduras de recipientes.
AWS D1.1	Porosidad	En soldadura a tope, porosidad radiográfica no debe exceder tamaño/distribución (ej. diámetro máx. 1/16.º 1.6 mm).
API 1104	Falta de penetración	En tuberías, longitud acumulada de falta de penetración interna limitada según diámetro.
ISO 5817	Socavado	Profundidad máxima según nivel calidad (B, C, D). Ej. nivel B: $\leq$ 0.5 mm.

Nota: Criterios orientativos. Consultar norma aplicable.

9.5.1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Sección VIII)

Aplica a recipientes a presión. Los criterios son muy estrictos: no se permiten fisuras de ningún tipo; la porosidad tiene límites según el espesor; las inclusiones de escoria están limitadas en tamaño y cantidad.

9.5.2. AWS D1.1 - Structural Welding Code (Steel)

Código para estructuras de acero. Define niveles de aceptación para porosidad, socavado, falta de fusión, etc., basados en el tipo de junta y la solicitación.

9.5.3. API 1104 - Welding of Pipelines and Related Facilities

Para tuberías de transporte. Establece criterios para soldaduras de campo, incluyendo límites para falta de penetración interna, mordeduras y porosidad.

9.5.4. ISO 5817 - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys

Nivel de calidad (B, C, D) con requisitos decrecientes. Define límites para cada tipo de defecto.

9.6. Documentación y registros

El control de calidad genera documentación esencial:

- **WPS (Welding Procedure Specification):** Especificación del procedimiento.
- **PQR (Procedure Qualification Record):** Registro de calificación.
- **WPQ (Welder Performance Qualification):** Calificación del soldador.
- **Informes de END:** Resultados de inspecciones.
- **Certificados de materiales y consumibles.**

9.7. Tips de examen

- La radiografía es obligatoria en muchos códigos para recipientes a presión y tuberías críticas.
- El ultrasonido es más sensible que la radiografía para detectar fisuras planas (falta de fusión, fisuras) si están orientadas adecuadamente.
- La inspección visual es siempre el primer paso y no debe omitirse.
- Los criterios de aceptación varían con el nivel de calidad: una soldadura clase B (ISO 5817) es más exigente que clase D.
- En API 1104, la falta de penetración interna se permite solo hasta cierta longitud acumulada, dependiendo del diámetro de la tubería.

9.8. Normas citadas

- ISO 6520: Clasificación de imperfecciones.
- AWS A3.0: Términos y definiciones.
- AWS B4.0: Métodos de ensayo mecánicos.
- ASME Sección VIII, AWS D1.1, API 1104, ISO 5817.

10. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

10.1. Generalidades

La calificación de soldadores y procedimientos es un requisito fundamental en la construcción soldada para garantizar que las uniones cumplan con los estándares de calidad y seguridad exigidos por los códigos y normas aplicables. Permite:

- Asegurar la repetibilidad del proceso.
- Verificar que el personal posee la destreza necesaria.
- Controlar las variables que afectan la calidad de la soldadura.
- Cumplir con requisitos legales y contractuales.

10.2. Ventajas del control del proceso mediante calificación

- Reducción de defectos y reprocesos.
- Mayor confiabilidad estructural.
- Documentación trazable de los procedimientos y del personal.
- Base para la mejora continua y la optimización de parámetros.

10.3. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

La WPS (Welding Procedure Specification) es un documento que describe en detalle cómo debe realizarse una operación de soldadura para obtener una unión con las propiedades requeridas. Contiene:

- Variables esenciales: aquellas que, si se modifican, afectan significativamente las propiedades mecánicas (ej. proceso, metal base, espesor, metal de aporte, precalentamiento, PWHT, posición, etc.).
- Variables no esenciales: pueden cambiarse sin necesidad de recalificar (ej. acabado de la raíz, tipo de gas de respaldo, etc.).
- Variables suplementarias: aplican a ensayos específicos como impacto (ej. temperatura de precalentamiento mínima, energía de aporte máxima).

La WPS se basa en un PQR (Procedure Qualification Record) que respalda los valores propuestos.

10.4. Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)

El PQR es el informe que documenta los resultados de las probetas soldadas según un WPS y los ensayos realizados (tracción, doblado, impacto, dureza, etc.). Sirve para demostrar que el procedimiento produce una soldadura con las propiedades exigidas.

10.5. Calificación de Soldadores (WPQ)

La WPQ (Welder Performance Qualification) evalúa la habilidad del soldador para depositar un cordón sano siguiendo un WPS específico. Consiste en soldar probetas bajo condiciones definidas, las cuales son examinadas mediante ensayos no destructivos y destructivos (generalmente doblado y/o radiografía). El alcance de la calificación queda limitado por:

- Proceso de soldadura.
- Tipo de junta (ranura, filete).
- Posición de soldadura (1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 6G).
- Espesor y diámetro (en tuberías).
- Material base y metal de aporte.
- Tipo de corriente y polaridad (en algunos casos).

10.6. Documentos de calificación

Doc.	Significado	Descripción
WPS	Welding Procedure Specification	Documento que describe las variables esenciales, no esenciales y suplementarias para un procedimiento de soldadura. Incluye: proceso, material base, espesor, posición, metal de aporte, parámetros, precalentamiento, PWHT, etc.
PQR	Procedure Qualification Record	Registro de los resultados de los ensayos que califican un WPS. Contiene los valores reales de las variables y los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos.
WPQ	Welder Performance Qualification	Registro que demuestra la habilidad de un soldador para depositar un cordón sano según un procedimiento. Incluye probetas, ensayos y alcance de la calificación.

10.7. Códigos ASME, AWS y API: aplicaciones

Cada código establece requisitos específicos para la calificación de procedimientos y soldadores, así como los criterios de aceptación de las probetas. A continuación se resumen los principales:

Código	Alcance	Aplicaciones típicas
ASME Sección IX	Calificación de soldadores y procedimientos para recipientes a presión y calderas	Industria petroquímica, generación de vapor, equipos a presión
AWS D1.1	Código de soldadura estructural para acero	Estructuras metálicas (edificios, puentes), construcciones civiles
API 1104	Soldadura de tuberías y sistemas de tuberías para la industria petrolera	Oleoductos, gasoductos, líneas de transmisión
AWS D1.2	Código de soldadura estructural para aluminio	Estructuras de aluminio
AWS D1.6	Código de soldadura estructural para aceros inoxidables	Estructuras de inoxidable
ISO 15614	Especificación y calificación de procedimientos de soldadura para metales	Normativa europea, aplicaciones diversas

10.7.1. ASME Sección IX

Es el código más utilizado para recipientes a presión y calderas. Divide las variables en esenciales, no esenciales y suplementarias. Requiere que cada fabricante califique sus procedimientos y que los soldadores sean evaluados según los lineamientos de la Sección IX.

10.7.2. AWS D1.1

Código para estructuras de acero. Define requisitos para WPS, PQR y WPQ, con énfasis en ensayos de doblado y impacto según el tipo de acero. Es ampliamente usado en la construcción de edificios, puentes y otras estructuras metálicas.

10.7.3. API 1104

Aplica a la soldadura de tuberías en la industria del petróleo y gas. Tiene criterios específicos para la calificación de procedimientos y soldadores en campo, incluyendo ensayos de doblado, tracción y, en algunos casos, impacto.

10.8. Procedimiento típico de calificación

1. Elaborar una WPS preliminar basada en experiencias previas o datos de consumibles.
2. Soldar probetas siguiendo la WPS, registrando todas las variables reales.
3. Realizar ensayos no destructivos y destructivos según el código aplicable.
4. Si los resultados son aceptables, se emite un PQR.
5. La WPS se considera calificada y puede ser utilizada en producción.
6. Para calificar soldadores, se preparan probetas similares y se ensayan; si pasan, se emite un WPQ.

10.9. Tips de examen

- Las variables esenciales son las que requieren recalificación si cambian. Por ejemplo, en ASME IX, pasar de FCAW a GMAW es un cambio de proceso (esencial).
- En AWS D1.1, el cambio de posición de plana a vertical es esencial para el soldador, pero no necesariamente para el procedimiento si ya fue calificado en esa posición.
- La vigencia de la calificación de un soldador suele ser de 6 meses a 2 años, dependiendo del código, y puede perderse si no se utiliza.
- Los ensayos de doblado (face, root, side) son comunes para evaluar la ductilidad y solidez de la unión.
- En API 1104, la calificación de soldadores en tubería incluye probetas de doblado y, a veces, radiografía.

10.10. Normas citadas

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX.
- AWS D1.1, D1.2, D1.6.
- API Standard 1104.
- ISO 15614 (serie).

11. COSTOS DE LA SOLDADURA

11.1. Importancia del análisis de costos

El costo de una unión soldada es un factor determinante en la selección del proceso, los consumibles y la metodología de trabajo. Un análisis detallado permite optimizar recursos, mejorar la productividad y ser competitivo. Los costos se dividen en tres categorías principales:

- **Mano de obra:** Sueldo del soldador y personal auxiliar, tiempo de preparación, soldadura y limpieza.
- **Materiales:** Consumibles (electrodos, alambre, gas, fundente), materiales base, repuestos de equipos.
- **Gastos generales (overhead):** Amortización de equipos, energía eléctrica, instalaciones, administración, controles de calidad.

11.2. Componentes del costo de materiales

Los costos de materiales incluyen:

- **Consumibles de aporte:** Precio por kilogramo o por metro de electrodo/alambre, considerando la eficiencia de deposición (relación entre metal depositado y consumido).
- **Gases de protección:** Costo por litro o por cilindro, según caudal y tiempo de arco.
- **Fundentes (SAW, algunos FCAW):** Precio por kg, con tasa de consumo.
- **Electrodos de tungsteno (GTAW):** Vida útil y costo de reemplazo.
- **Energía eléctrica:** Potencia consumida × tiempo × tarifa.

11.3. Costo de mano de obra

Se calcula en función del tiempo total que el soldador y su equipo están ocupados en la tarea, incluyendo:

- Tiempo de arco (tiempo efectivo de soldadura).
- Tiempo de preparación (limpieza, posicionamiento, cambio de electrodo, etc.).
- Tiempo de inspección y correcciones.
- Tiempo de desplazamiento y descansos (factor de ciclo de trabajo).

La tarifa horaria del soldador (incluyendo cargas sociales) multiplicada por el tiempo total da el costo de mano de obra.

11.4. Gastos generales (overhead)

Incluyen:

- Amortización de equipos (fuentes de poder, alimentadores, posicionadores).
- Mantenimiento de equipos y herramientas.
- Alquiler o depreciación de instalaciones.
- Consumibles indirectos (discos de desbaste, cepillos, etc.).
- Costos administrativos y de gestión de calidad.

11.5. Factores que influyen en la productividad

- **Eficiencia de deposición:** Porcentaje del consumible que se convierte en metal depositado (pérdidas por salpicadura, escoria, humos).
- **Tasa de deposición:** Masa de metal depositado por unidad de tiempo de arco (kg/h).
- **Ciclo de trabajo:** Porcentaje del tiempo total que el soldador está realmente soldando (incluye cambios de electrodo, limpieza, etc.).
- **Velocidad de avance:** Longitud de cordón por unidad de tiempo.

Proceso	Eficiencia de deposición (%)	Tasa de deposición (kg/h)	Ciclo de trabajo típico (%)
SMAW (manual)	55–65	1–3	20–30
GMAW (semiautomático)	85–95	3–8	40–60
FCAW (con gas)	80–90	4–10	40–60
FCAW (autoprotegido)	75–85	3–7	40–60
SAW (automático)	95–99	5–20	80–100
GTAW (manual)	90–98	0,5–2	20–40

11.6. Cálculo del costo por metro de cordón

Un método práctico para comparar procesos es calcular el costo total por metro de soldadura, sumando materiales y mano de obra. A continuación se muestra un ejemplo comparativo entre SMAW y GMAW para un filete de 6 mm.

Concepto	SMAW	GMAW
Electrodo/Alambre	E7018 (4 mm)	ER70S-6 (1,2 mm)
Precio ($/kg)	4	3,5
Cateto (k) [mm]	6	6
Masa depositada [kg/m]	0,141	0,141
Eficiencia depos. (%)	60	90
Masa consumible [kg/m]	0,235	0,157
Costo consumible [$/m]	**0,94**	**0,55**
Tasa deposición [kg/h]	2	5
Tiempo arco [min/m]	4,23	1,69
Ciclo trabajo (%)	25	50
Tiempo total [min/m]	16,9	3,38
Costo MO [$/m] (20$/h)	5,63	1,13
Costo total [$/m]	**6,57**	**1,68**

Nota: Valores ilustrativos. Costos reales dependen de factores locales.

11.7. Estrategias para reducir costos

- Seleccionar el proceso con mayor tasa de deposición y eficiencia (cuando sea técnicamente viable).
- Optimizar parámetros para minimizar salpicaduras y retrabajos.
- Reducir el volumen de soldadura (evitar sobredimensionamiento de cordones).
- Utilizar consumibles de alta eficiencia (ej. electrodos con polvo de hierro).
- Mejorar el ciclo de trabajo mediante mejor organización y reducción de tiempos muertos.
- Automatizar cuando sea posible (SAW, GMAW robotizado).
- Comprar consumibles al por mayor y negociar precios.
- Capacitar al personal para aumentar destreza y reducir errores.

11.8. Tips de examen

- La eficiencia de deposición es clave: en SMAW es baja por la pérdida en escoria y salpicaduras, mientras que en SAW es casi 100 %.
- El ciclo de trabajo afecta directamente el costo de mano de obra: un soldador que solo está 20 % del tiempo soldando (SMAW) tiene un costo por metro más alto que uno con 50 % (GMAW).
- En el ejemplo, GMAW resulta mucho más económico que SMAW para el mismo filete debido a mayor tasa de deposición y mejor ciclo de trabajo.
- No olvidar incluir los costos indirectos (gases, energía) en un análisis completo.

11.9. Normas y referencias

- Publicaciones de AWS sobre productividad y costos.
- Datos de fabricantes de consumibles.
- Ingeniería de métodos y estudio de tiempos.

12. SEGURIDAD INDUSTRIAL EN SOLDADURAS

12.1. Importancia de la seguridad en soldadura

La soldadura involucra múltiples riesgos para la salud e integridad física del operario y de quienes trabajan en el entorno. Una cultura de seguridad basada en la prevención, el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP) y el cumplimiento de normas es fundamental para evitar accidentes y enfermedades profesionales.

12.2. Reglas básicas de seguridad

- **Protección personal:** Usar siempre careta con filtro apropiado, guantes de cuero, delantal o chaqueta resistente al fuego, botas de seguridad con puntera y protección auditiva cuando sea necesario.
- **Equipos en buen estado:** Revisar cables, pinzas, portaelectrodos y conexiones antes de comenzar. No usar equipos dañados.
- **Ventilación:** Asegurar adecuada ventilación o extracción localizada para evitar acumulación de humos y gases tóxicos.
- **Orden y limpieza:** Mantener el área de trabajo libre de materiales combustibles, aceites y obstáculos.
- **Señalización:** Delimitar la zona de soldadura para proteger a terceros de radiaciones y chispas.
- **Manipulación de cilindros:** Transportar con cuidado, asegurar en posición vertical, cerrar válvulas cuando no se usen, mantener alejados de fuentes de calor.
- **Primeros auxilios:** Conocer la ubicación de extintores, botiquines y salidas de emergencia. Tener formación básica en primeros auxilios.

12.3. Riesgos específicos y medidas preventivas

riesgo	Fuente	Medidas preventivas
Eléctrico	Contacto directo con partes bajo tensión (portaelectrodo, pinza masa, cables dañados)	Tensión en vacío adecuada, cables en buen estado, puesta a tierra correcta, guantes secos y aislantes, evitar condiciones húmedas.
Radiaciones	Arco voltaico (rayos UV e IR)	Careta con filtro DIN adecuado, ropa de algodón, guantes y mangas largas, pantallas para otros trabajadores.
Humos y gases	Descomposición de revest., gases (CO, CO_2, NO_x), humos metálicos (Zn, Cd, Cr)	Ventilación general y localizada, equipos de respiración si necesario, posicionarse a favor del viento, conocer materiales y riesgos.
Incendio y explosión	Chispas, escoria caliente, gases inflamables (acetileno, hidrógeno)	Limpiar área de combustibles, extintores adecuados, inspeccionar equipos de gas, cilindros verticales y asegurados.
Ruido	Esmerilado, picado de escoria, procesos de alta potencia	Protección auditiva (tapones, orejeras), medición de niveles, mantenimiento de equipos.
Ergonómicos	Posturas forzadas, trabajos sobrecabeza, movimientos repetitivos	Posicionar pieza a altura adecuada, usar dispositivos de manipulación, pausas y rotación de tareas.

12.4. Norma AWS Z49.1 - Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes

Es la norma de referencia en seguridad para soldadura en Estados Unidos y ampliamente adoptada internacionalmente. Cubre:

- **Protección personal:** Requisitos para caretas, filtros, ropa, guantes, calzado.
- **Ventilación:** Límites de exposición a humos y gases, métodos de control.
- **Prevención de incendios:** Procedimientos seguros, almacenamiento de materiales, extintores.
- **Equipos eléctricos:** Instalación, mantenimiento, puesta a tierra, tensión en vacío.
- **Manipulación de gases comprimidos:** Almacenamiento, transporte, uso.
- **Señalización y rotulado:** Advertencias en áreas de trabajo.
- **Capacitación:** Obligación de entrenar al personal en prácticas seguras.

La norma se actualiza periódicamente y debe ser consultada para aplicaciones específicas.

12.5. Otras normas y regulaciones aplicables

- **OSHA 29 CFR 1910 (EE.UU.):** Normativa de seguridad laboral que incluye requisitos para soldadura.
- **ISO 15011:** Salud y seguridad en soldadura – Determinación de emisiones de humos y gases.
- **ANSI Z87.1:** Protección ocular y facial.
- **NFPA 51B:** Prevención de incendios durante soldadura y corte.
- **Normas locales:** Cada país tiene su propia regulación (ej. en Argentina, leyes de higiene y seguridad).

12.6. Equipos de protección personal (EPP) recomendados

- **Careta de soldar:** Con filtro automático o fijo, con número DIN adecuado a la corriente usada.
- **Guantes de soldador:** De cuero, con protección para antebrazo.
- **Ropa de trabajo:** Camisa y pantalón de algodón grueso (no sintético), sin bolsillos vueltos hacia arriba.
- **Delantal de cuero:** Para trabajos prolongados o posiciones especiales.
- **Botas de seguridad:** Con puntera de acero y suela aislante.
- **Protección auditiva:** Tapones u orejeras si el nivel de ruido supera los límites permisibles.
- **Respirador:** Para ambientes con ventilación insuficiente o cuando se sueldan materiales que generan humos tóxicos (acero inoxidable, galvanizado, etc.).

12.7. Buenas prácticas en el lugar de trabajo

- Realizar una evaluación de riesgos antes de comenzar cada trabajo.
- Asegurar que el área esté libre de materiales inflamables en un radio de al menos 10 metros.
- Disponer de un extintor adecuado (tipo ABC) accesible.
- Verificar que la ventilación esté funcionando correctamente.
- Inspeccionar diariamente los cables y conexiones.
- No soldar en recipientes que hayan contenido combustibles sin previa limpieza y purga.
- Utilizar pantallas o biombos para proteger a otros trabajadores.
- Mantener las vías de evacuación despejadas.

12.8. Tips de examen

- La norma AWS Z49.1 es la base de seguridad en soldadura; sus recomendaciones son ampliamente aceptadas.
- La ventilación es crítica: humos de cadmio, cromo, níquel y otros metales pueden causar daños graves a la salud.
- La radiación UV del arco puede causar quemaduras en la piel y .ºjo de arco"(queratoconjuntivitis actínica) en minutos.
- Nunca soldar con guantes húmedos o en superficies mojadas (riesgo de electrocución).
- Los cilindros de gas deben almacenarse lejos de fuentes de calor y asegurados para evitar caídas.

12.9. Normas citadas

- AWS Z49.1: Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes.
- OSHA 29 CFR 1910.
- ANSI Z87.1, NFPA 51B, ISO 15011.